

Babić, Ž., Aleksandrović, S., Stefanović, M., Šljivić, M.

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA OBRADIVOSTI „TAILORED” LIMOVA

Rezime: U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja obradivosti plastičnim oblikovanjem „tailored” lima dobijenog laserskim zavarivanjem limova različite debljina (0,8 mm i 1,5 mm) od istog materijala (čelik povišene čvrstoće sa BH efektom) i istog stanja površine (galvanski pocinkovano). Primenjeno je ispitivanje zatezanjem serije epruveta sa poprečno postavljenim laserskim zavarom u odnosu na uzdužnu osu epruvete. Definisani su sledeći pokazatelji obradivosti: osnovne mehaničke karakteristike, krive tečenja, r-faktor i n-faktor. Izvršena je analiza deformisanja svakog lima pojedinačno i zavarrenog sklopa. Zaključci ukazuju na specifičan uticaj nehomogenosti koju čine različite debljine limova i zona zavara i upućuju na naredna ispitivanja sa uzdužnim i kosim položajima zavara u odnosu na pravac delovanja sile.

Ključne reči: „tailor welded blanks” limovi, duboko izvlačenje, obradivost

DETERMINATION OF TAILOR WELDED BLANKS FORMABILITY CHARACTERISTICS

Abstract: Presented in the paper are the results of experimental investigations of tailor welded blanks formability. Blanks were made by laser welding of two sheets with different thickness (0.8 mm and 1.5 mm), the same material (high strength steel with BH effect) and the same surface condition (galvanic zinc coating). Investigation by uniaxial tension were applied on series of specimens with transverse weld line. Following formability properties are determined: basic mechanical properties, strengthening curves, r-value and n-value. Forming analysis of each sheet separately and assembly was performed. Conclusions are pointing out specific influence of inhomogeneity caused by different thickness and welding zone and leading to further investigations with longitudinal and angled positions of welded line related to force action direction.

Key words: tailor welded blanks, sheet metals, deep drawing, formability

1. UVOD

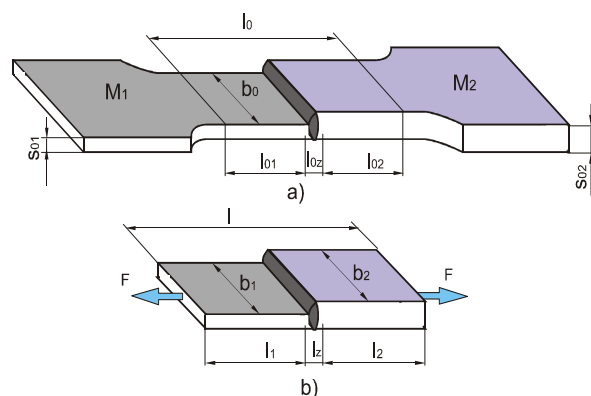
Pod terminom „tailored” limovi ili „tailor welded blanks” (TWB) podrazumevaju se prethodno isečeni („iskrojjeni”), a zatim laserski zavareni komadi od lima, čime se dobija jedinstvena celina koja predstavlja razvijeno stanje za operacije plastičnog oblikovanja, najčešće duboko izvlačenje. Komponente (komadi) u formiranom zavarenom sklopu mogu da budu sa različitim: debljinama (najčešće), vrstama materijala i kvalitetima površina i prevlaka. Primenom TWB postižu se značajni efekti (pre svega u automobilskoj industriji): smanjenje mase, povećanje krutosti, smanjenje ukupnih troškova proizvodnje (manji broj alata, smanjeno vreme projektovanja, manji broj radnih mesta itd.), [1, 2]. Tokom zadnje decenije registrovan je nagli porast primene TWB, naročito u industriji vozila. Procenjuje se da je 2001.g. globalno proizvedeno oko 120 miliona TWB delova. Taj broj je porastao u 2005.g. na oko 250 miliona delova (web sajtovi [1]).

Plastično deformisanje TWB izvodi se u otežanim uslovima zbog izrazite nehomogenosti materijala (različite debljine, materijali, stanja površina). Procena obradivosti može da se izvede različitim eksperimentalnim testovima ili kompjuterskim simulacijama. Test jednoosnog zatezanja predstavlja osnovni, ali i najznačajniji izvor informacija o obradivosti TWB. Različiti autori primenjuju uzdužni položaj zavara (poklapa se sa osom standardne epruvete) [3, 4, 5], ili poprečni (upravan na osu epruvete) [5]. U istraživanjima koja su izvedena na Mašinskim fakultetima u Kragujevcu i Banja Luci primenjena su oba položaja zavarene zone, a u toku su eksperimenti sa kosim položajima zavara u odnosu na uzdužnu osu epruvete. Ovaj rad prikazuje rezultate za poprečni položaj zavara, koji je upravan na uzdužnu osu epruvete i nalazi se na polovini merne dužine od 80 mm.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

2.1 Osnovni podaci o materijalu i eksperimentu

Ispitivanje se radi prema standardu EN 10002 u delu koji se odnosi na ispitivanje limova. Posebnih standarda za ispitivanje TWB nema. U konkretnom eksperimentu vrši se istivanje tri serije epruveta. Prva se odnosi na standardno ispitivanje tanjeg (0,8 mm) materijala, druga na ispitivanje debljeg (1,5 mm) materijala i treća na ispitivanje TWB sa poprečnim položajem zavara na sredini merne dužine od 80 mm. Širina epruvete je 20 mm (sl. 1). Limovi su od istog materijala koji po DIN-u ima oznaku ZStE 180 BH03ZE (odgovara brojnoj oznaci 1.0395). Reč je o niskougljeničnom čeličnom limu koji ima tzv. „bake hardening” efekat (BH) povećanja čvrstoće tokom procesa pečenja boje na karoseriji automobila. Na obe strane lima galvanskim putem naneta je prevlaka cinka. Hemijski sastav je dat u tabeli 1. Upadljiv je nešto veći sadržaj mangana. Analiza hemijskog sastava je



Slika 1. Epruveta pre (a) i posle (b) zatezanja

uradena u Laboratoriji preduzeća „Čajavec” – Banja Luka.

Materijal	Hemijski elementi				
	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
ZStE180 BH 0,8 mm	0,02	0,15	<0,05	0,010	0,014
ZStE180 BH 1,5 mm	0,03	0,15	<0,05	0,017	0,015

Materijal	Hemijski elementi			
	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Al [%]
ZStE180 BH 0,8 mm	0,028	0,03	0,03	0,07
ZStE180 BH 1,5 mm	0,028	0,04	0,03	0,061

Tabela 1 Hemijski sastav osnovnih materijala TWB

Zatezanje je izvedeno na kompjuterizovanom mernom sistemu Zwick/Roell Z 100 (merni opseg sile 100 kN, tačnost očitavanja sile 1 N, početna merna dužina ekstenzometra 80 mm, tačnost očitavanja izduženja 0,001 mm, softver-TestXpert ver. 1).

2.2 Rezultati eksperimenta

U tabelama 2 i 3 dati su, pored osnovnih mehaničkih karakteristika, koeficijent normalne anizotropije (r-faktor), eksponent ojačanja (n-faktor) i faktor $\Delta r = r_{\max} - r_{\min}$. Sve vrednosti su određene i s obzirom na ravansku anizotropiju. Referentni pravac je pravac valjanja (0°).

Materijal: ZStE180 BH s=0,8 mm				
Karakteristike	Ugao			Srednja vrednost
	0°	45°	90°	
Granica tečenja R_p [MPa]	202,10	211,5	197,45	205,64
Zatezna čvrstoća R_m [MPa]	294,86	309,6	294,74	302,20
Odnos R_p/R_m	0,69	0,68	0,67	0,68
Prekidno izduženje A_{80} [%]	29,03	26,95	29,05	27,99
n-faktor	0,192	0,192	0,166	0,185
r-faktor	1,73	1,16	1,87	1,48
Δr -faktor				0,71

Tabela 2 Karakteristike tanjeg lima

Iz podataka datih u tabelama 2 i 3 zaključuje se da oba lima imaju osobine dobre plastičnosti i obradivosti. Visoka vrednost r-faktora garantuje otpornost prema stanjenju što je

ključno za duboko izvlačenje. Deblji lim ima i nešto veće vrednosti r-faktora, dok su vrednosti granice tečenja i zatezne čvrstoće generalno niže tako da se njihov odnos praktično ne menja.

Materijal: ZStE180 BH s=1,5 mm				
Karakteristike	Ugao			Srednja vrednost
	0°	45°	90°	
Granica tečenja R_p [MPa]	174,35	183,8	182,36	181,05
Zatezna čvrstoća R_m [MPa]	262,17	263,7	263,76	263,36
Odnos R_p/R_m	0,67	0,70	0,69	0,69
Prekidno izduženje A_{80} [%]	36,69	35,05	35,43	35,56
n-faktor	0,217	0,193	0,214	0,204
r-faktor	1,79	1,35	2,07	1,64
Δr -faktor				0,72

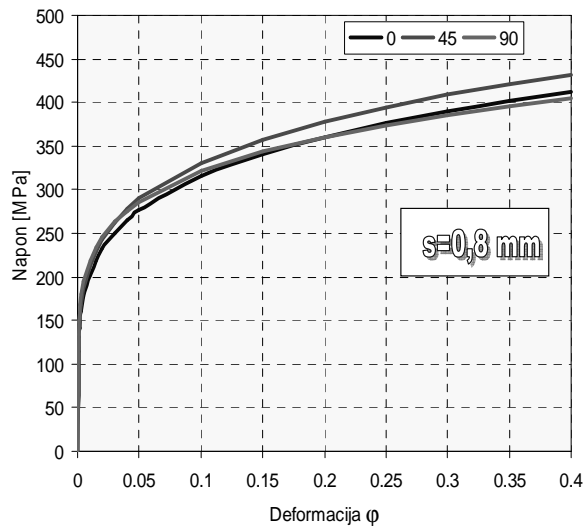
Tabela 3 Karakteristike debljeg lima

U tabeli 4 dat je pregled aproksimativnih funkcija krivih ojačanja s obzirom na ravansku anizotropiju. Grafički prikaz krivih ojačanja je dat na slikama 2 i 3. Treba naglasiti da oba lima imaju veoma dobru plastičnost i relativno malu čvrstoću. Međutim, pokazatelji čvrstoće dati u tabelama 2, 3 i 4 nisu konačni zbog BH efekta koji se aktivira plastičnom deformacijom i procesom pečenja boje i može da rezultira povećanjem čvrstoće oko 20% ,[6].

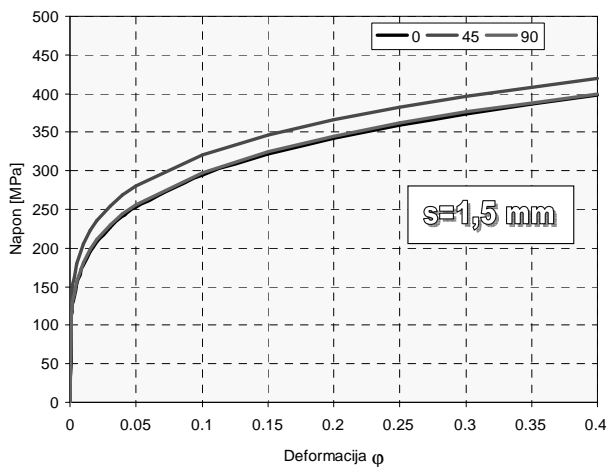
Materijal	Ugao	Analitički oblik krive ojačanja
s=0,8 mm	0°	$K=490,72 \varphi^{0,192}$ $K=202,10+322,20 \varphi^{0,443}$
	45°	$K=514,91 \varphi^{0,192}$ $K=211,49+338,25 \varphi^{0,440}$
	90°	$K=470,58 \varphi^{0,166}$ $K=197,45+303,10 \varphi^{0,395}$
	Xsr	$K=497,78 \varphi^{0,185}$ $K=205,63+325,45 \varphi^{0,429}$
s=1,5 mm	0°	$K=485,54 \varphi^{0,217}$ $K=174,35+325,45 \varphi^{0,540}$
	45°	$K=500,02 \varphi^{0,193}$ $K=183,80+353,38 \varphi^{0,595}$
	90°	$K=486,44 \varphi^{0,214}$ $K=182,26+339,10 \varphi^{0,557}$
	Xsr	$K=493,01 \varphi^{0,204}$ $K=181,05+347,21 \varphi^{0,572}$

Tabela 4 Krive ojačanja osnovnih materijala u analitičkom Obliku

Kod zatezanja epruvete izrađene od TWB sa poprečnim položajem linije zavaru ukupna deformacija početne merne dužine l_0 (sl. 1) može da se podeli u tri zone: deformacija tanjeg materijala, deformacija debljeg materijala i deformacija zone zavaru. Zona zavaru ima znatno veću čvrstoću, malu plastičnost i malu dužinu (reda veličine 1 mm) pa se njeno učešće zanemaruje. Vrednosti deformacija zavise od mehaničkih karakteristika limova, intenziteta ojačanja kao i odnosa debljina.



Slika 2. Krive ojačanja (gornja kriva važi za ugao 45°)



Slika 3. Krive ojačanja (gornja kriva važi za ugao 45°)

Ako se razmotri opšti slučaj deformisanja TWB od različitih materijala na sl. 4 vide se tri faze procesa. Da bi došlo do plastične deformacije i tanjeg i debljeg lima, maksimalna sila koju može da izdrži tanji materijal mora u debljem limu da izazove napon veći od granice tečenja.

Prethodni uslov može da se izrazi na sledeći način:

$$R_{m1} s_{o1} b_0 > R_{p2} s_{o2} b_0 \quad (1)$$

Nejednakost (1) u konkretnom slučaju može da se iskoristi za definisanje potrebnih debljina limova da bi se obe strane TWB plastično deformisale. Ako se fiksira debljina $s_{o1}=0,8$ mm onda:

$$s_{o2} < s_{o1} \frac{R_{m1}}{R_{p2}} = 0,8 \cdot \frac{294,74}{183,36} = 1,29 \text{ mm} \quad (2)$$

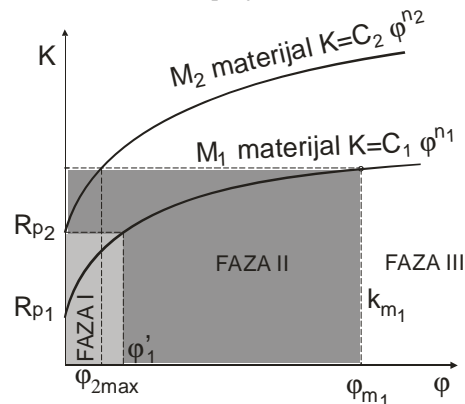
Očigledno, u razmatranom primeru uslov (2) nije ispunjen što znači da se izdužuje samo tanji deo TWB.

Ako se fiksira $s_{o2}=1,5$ mm onda važi:

$$s_{o1} > s_{o2} \frac{R_{p2}}{R_{m1}} = 1,5 \cdot \frac{183,36}{294,74} = 0,93 \text{ mm} \quad (3)$$

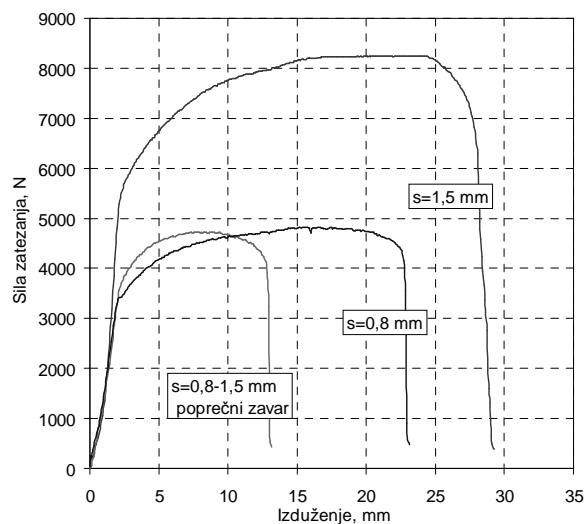
Uslov (3) znači da ako deblji lim ima 1,5 mm, tanji mora da bude minimalne debljine 0,93 mm da bi se trajno deformisale obe strane TWB.

Kako uslovi (2) i (3) nisu ispunjeni deformiše se samo tanja



Slika 4. Faze zatezanja TWB

zona TWB, što se i vidi na sl. 5. Maksimalna ostvarena sila zatezanja za TWB približno je jednaka maksimalnoj sili za tanji lim. Izduženje je znatno manje.



Slika 5 Zavisnost sila zatezanja od izduženja

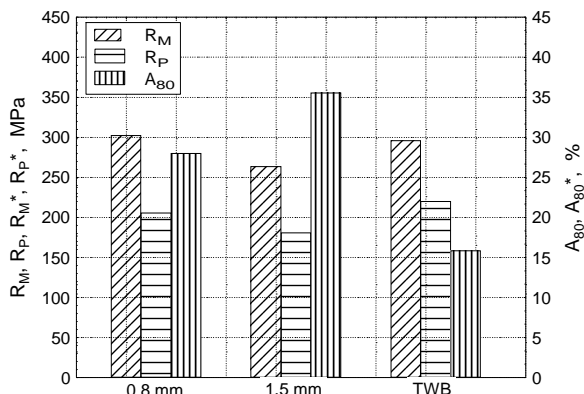
Treba naglasiti da se pri oblikovanju delova složenih geometrija dubokim izvlačenjem plastično deformišu i jedan i drugi lim zbog drugačijih naponsko deformacionih uslova (geometrija, tribološki uslovi itd.), [7]. Neodgovarajuće tumačenje rezultata ispitivanja zatezanjem može dovesti do greške.

Ako su poznate mehaničke karakteristike nezavarenih osnovnih materijala, nije moguće odrediti karakteristike TWB. U slučajevima kad se plastično deformiše samo tanji materijal, naponske karakteristike (na pr. zatezna čvrstoća i granica tečenja) važe sa manjom razlikom i za TWB. Ako se deformišu oba lima to nije slučaj. Karakteristike deformacija (kao što su ravnomerno izduženje A_g i maksimalno izduženje A_{80}) se u svakom slučaju bitno razlikuju. Zato se kod TWB ne može govoriti o izduženjima definisanim u standardima. Zbog toga su odgovarajuće vrednosti u tabeli 5 i na sl. 6 označene zvezdicama.

U konkretnom ispitivanju, razaranje (lom epruvete) se dogodilo približno na polovini rastojanja između linije zavaru i početka proširenja tanjeg dela epruvete.

	R_M , MPa	R_P , MPa	A_{80} , %
Lim 0,8 mm	302,2	205,64	27,99
Lim 1,5 mm	263,36	181,05	35,56
TWB	295,93	220	15,86

Tabela 5 Osnovne mehaničke karakteristike



Slika 6. Osnovne mehaničke karakteristike

Zavisno od odnosa koji karakterišu kvalitet materijala i odnosa debljina limova, mogući su različiti slučajevi plastičnog deformisanja delova epruvete od TWB limova pri zatezanju. U slučaju da su oba dela epruvete od istog materijala i iste debljine dolazilo bi do ravnomernog izduženja obe polovine epruvete jer bi se zavar zbog veće čvrstoće i malih dimenzija neznatno deformisao. Kada postoji razlika u karakteristikama materijala ili debljini lima (ili i jedno i drugo) situacija je složenija i treba pažljivo analizirati rezultate ispitivanja zatezanjem.

3. ZAKLJUČAK

Tailor Welded Blanks (TWB) limovi predstavljaju anizotropan i izrazito nehomogen materijal. U postupku definisanja obradivosti ovakvih limova plastičnim deformisanjem (najčešće dubokim izvlačenjem) prvi i veoma značajan eksperiment je ispitivanje jednoosnim zatezanjem. Obično se sastoji iz tri dela. Prvi je ispitivanje tanjeg materijala, drugi – ispitivanje debljeg i treći – ispitivanje TWB lima. Umesto promenljive debljine, može da bude razlika u karakteristikama materijala i stanju površine.

U ovom radu su, ukratko, izloženi rezultati ispitivanja TWB od limova različitih debljina sa analizom uslova deformisanja. U okviru rezultata određene su: osnovne mehaničke karakteristike (zatezna čvrstoća R_M , granica tečenja R_P i maksimalno izduženje A_{80}), eksponent deformacionog ojačanja (n-faktor), koeficijent normalne anizotropije (r-faktor) i krive ojačanja (dva tipa analitičkih eksponencijalnih aproksimacija). Sve karakteristike su određene vodeći računa o ravanskoj anizotropiji, tako da su epruvete isecane u tri pravca u odnosu na referentni pravac valjanja (0° , 45° , 90°). Definisane su i osrednjene vrednosti i Δr – faktor koji predstavlja razliku između maksimalne i minimalne vrednosti r faktora.

Pokazano je da je test jednoosnog zatezanja nezamenljiv i u ovom slučaju. Dati su uslovi plastičnog deformisanja obe polovine epruvete od TWB i naglašena ograničenja koja se pre svega odnose na nemogućnost definisanja karakteristika TWB na osnovu poznatih karakteristika osnovnih limova. Definisanje karakteristika TWB nije moguće u smislu postojećih standarda. Zavarena zona je izrazito mala zbog poznatih osobina postupka laserskog zavarivanja i ima čvrstoću znatno iznad čvrstoće osnovnih materijala, tako da, praktično, ne učestvuje u deformisanju. Treba, na kraju, naglasiti da osobine procesa jednoosnog deformisanja ne treba generalizovati na opštiji slučaj plastičnog deformisanja pri dubokom izvlačenju i savijanju koji dominiraju kod složenih karoserijskih otpresaka. Karakteristike imaju univerzalnu vrednost ali osobenosti deformisanja ne. Primer se vidi u ovom radu kada se plastično deformiše samo tanja polovina epruvete. To ne znači da se kod složenih otpresaka deformiše samo tanji lim, nego upozorava na pažljivu analizu i pravilno korišćenje dobijenih rezultata.

U okviru sveobuhvatnijeg istraživanja, čiji je jedan deo ukratko prezentiran u ovom radu, analizirano je i jednoosno zatezanje TWB sa uzdužnim položajem linije zavara u odnosu na podužnu osu epruvete, odnosno, na pravac delovanja sile. Naredno istraživanje (koje je u toku) obuhvatiće jednoosno zatezanje TWB sa kosim položajima linije zavara prema uzdužnoj osi epruvete, odnosno pravcu delovanja zatežuće sile.

4. LITERATURA

- [1] Babić Ž.: *Deformabilnost „tailored blanks” pri dubokom izvlačenju*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2004.
- [2] Babić Ž.: *Razvlačenje „tailored blanks” od materijala različite debljine*, Zbornik 31. SPM SCG, str. 153-158, Kragujevac, 2006.
- [3] Brabie G., Chirita B., Chirila C.: *Determination of the weld metal properties and behaviour in the case of tailor-welded blanks using the parallel tensile test and image-analysis method*, Archives of civil and mechanical engineering, 41-47, 2 (2004).
- [4] Abdullah K. et al.: *Tensile testing for weld deformation properties in similar gage tailor welded blanks using the rule of mixtures*, Journal of Mat. Process. Techn., 91-97, 112 (2001).
- [5] Panda S. K. et al.: *Characterization of tensile properties of tailor welded IF steel sheets and their formability in stretch forming*, Journal of Mat. Process. Techn., 321-332, 183 (2007).
- [6] Aleksandrović S., Stefanović M., Mandić V., Vujinović T.: *Perspektive primene i aktuelna pitanja obradivosti limova povišene čvrstoće*, Zbornik DEMI 2003., str. 79-84, Banja Luka, RS, BiH, 2003.
- [7] Stefanović M.: *Tribologija dubokog izvlačenja*, monografija, JDT i Mašinski fakultet, Kragujevac, 1994.

Web sajtovi:

- [1] www.autosteel.org

Autori: Babić, Ž., Aleksandrović, S., Stefanović, M., Šljivić, M.